

Zukünftige Entwicklung der Ozonschicht unter Einbeziehung des Klimawandels

Martin Dameris

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)
Institut für Physik der Atmosphäre, Oberpfaffenhofen, Germany

martin.dameris@dlr.de



Knowledge for Tomorrow



UN

World Meteorological Organization
Global Ozone Research and Monitoring Project—Report No. 58

SCIENTIFIC ASSESSMENT OF OZONE DEPLETION: 2018

Year	Policy Decisions
1981	
1985	Vienna Convention
1987	Montreal Protocol
1988	
1989	
1990	London Adjustment and Amendment
1991	
1992	
1992	Copenhagen Adjustment and Amendment
1994	
1995	Vienna Adjustment
1997	Montreal Adjustment and Amendment
1998	
1999	Beijing Adjustment and Amendment
2002	
2006	
2007	Montreal Adjustment
2010	
2014	
2016	Kigali Amendment
2018	



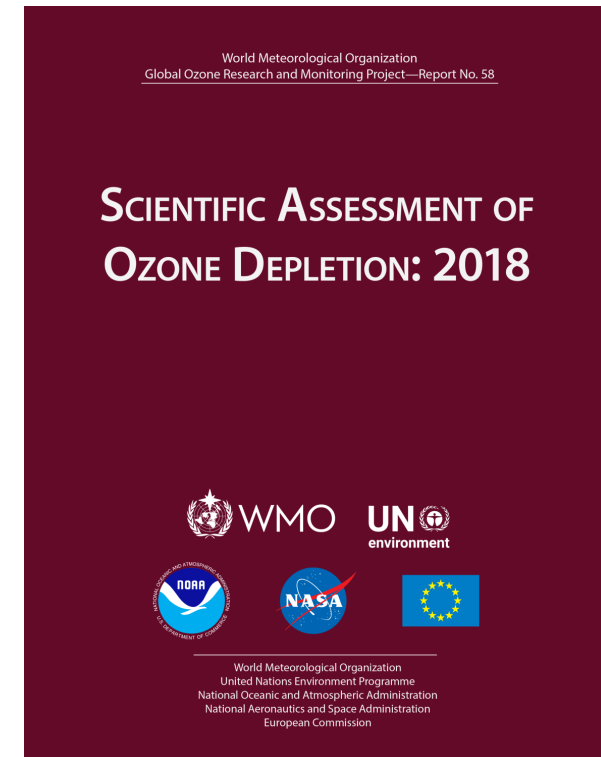
World Meteorological Organization
United Nations Environment Programme
National Oceanic and Atmospheric Administration
National Aeronautics and Space Administration
European Commission



WMO Berichte zur wissenschaftlichen Bewertung des Ozonabbaus

Der Ozonbericht 2018 (*Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018*) ist der neueste einer Serie von Sachstandsberichten, welcher durch ein wissenschaftliches Expertenteam der Atmosphärenforschung unter der Schirmherrschaft des Montrealer Protokolls* in Abstimmung mit der **Weltorganisation der Meteorologie (WMO)** und dem **Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP)** erstellt wurde. Der nun 9. Bericht enthält eine umfassende Beschreibung des aktuellen Sachstandes. Er dient als Grundlage zur Überwachung des Montreal-Prozesses zum Schutz der Ozonschicht.

* multilaterales Umweltabkommen und damit ein völkerrechtlich verbindlicher Vertrag des Umweltrechts



Wissenschaftlicher Inhalt des WMO Ozonberichts

Herausforderungen, Fragen und Aufgaben

- Ermittlung der Erholung der Ozonschicht in den letzten Jahren; Abschätzung der Entwicklung in den nächsten 5 bis 10 Jahren durch die Reglementierung der FCKWs (Montrealer Protokoll), insbesondere des stratosphärischen Chlorgehalts, aber auch unter dem Einfluss des Klimawandels und anderer beteiligter Faktoren.
- Vorhersage der zukünftigen Entwicklung der stratosphärischen Ozonschicht auf längeren Zeitskalen unter Berücksichtigung des Einflusses des Klimawandels. Bestimmung der Abhängigkeit der Ozoneholung in Raum und Zeit, insbesondere die Untersuchung der Entwicklung der Ozonschicht in den Polargebieten (Ozonloch).
- Wie wird sich die Ozonkonzentration in Abhängigkeit angenommener Klimaänderungsszenarien entwickeln? Werden in Zukunft höhere stratosphärische Ozonwerte ('super-recovery') als möglicher Indikator des Klimawandels erwartet?



Stand des Wissens (WMO, 2018)

<https://www.esrl.noaa.gov/csd/assessments/ozone/2018/report/>

Entwicklung der Ozonschicht außerhalb der Polarregionen



Gesamtozon Abweichungen (in %), bezogen auf das 1964-1980 Mittel (60°S - 60°N)

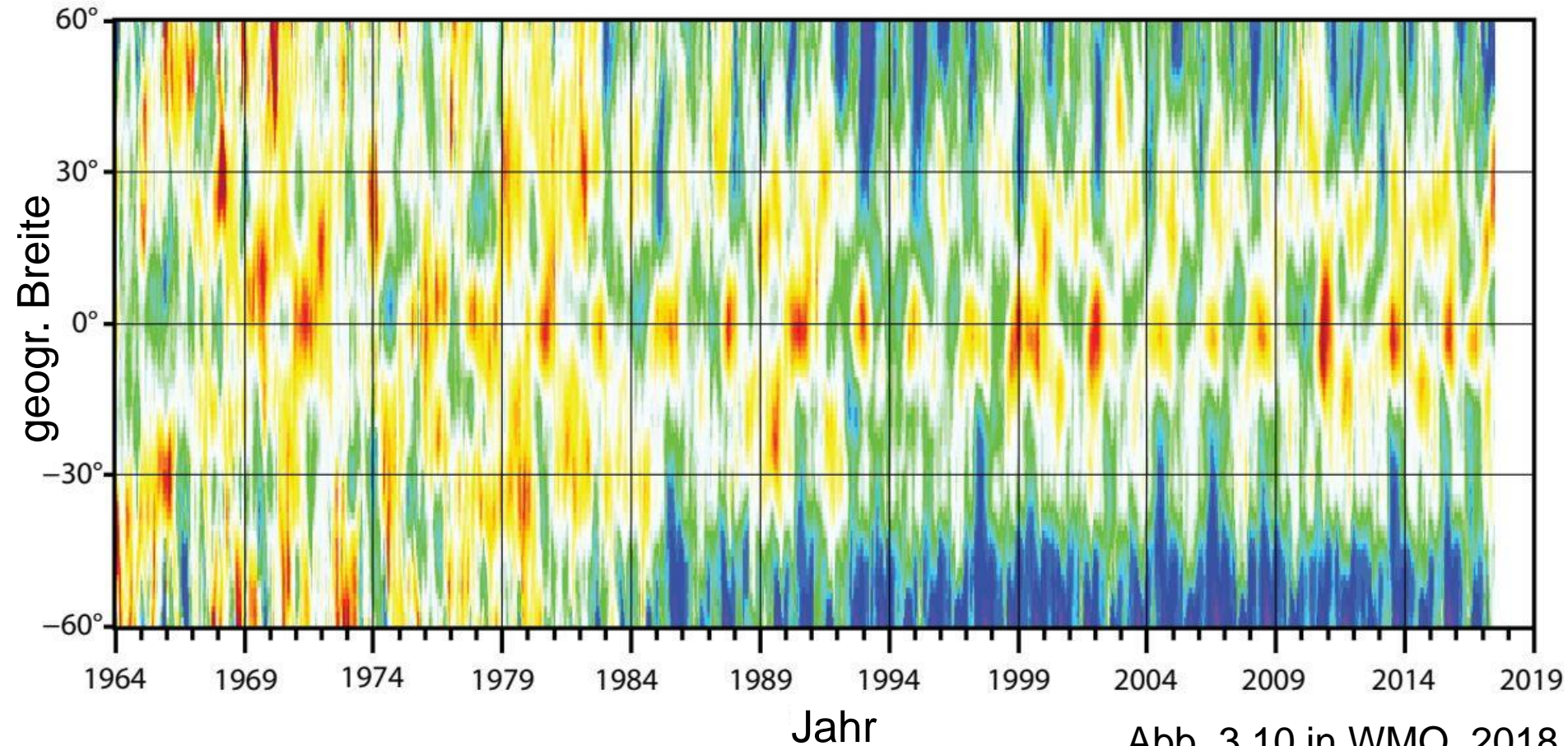
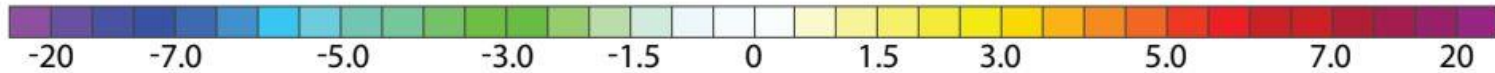


Abb. 3.10 in WMO, 2018



Ozontrends (60°S - 60°N)

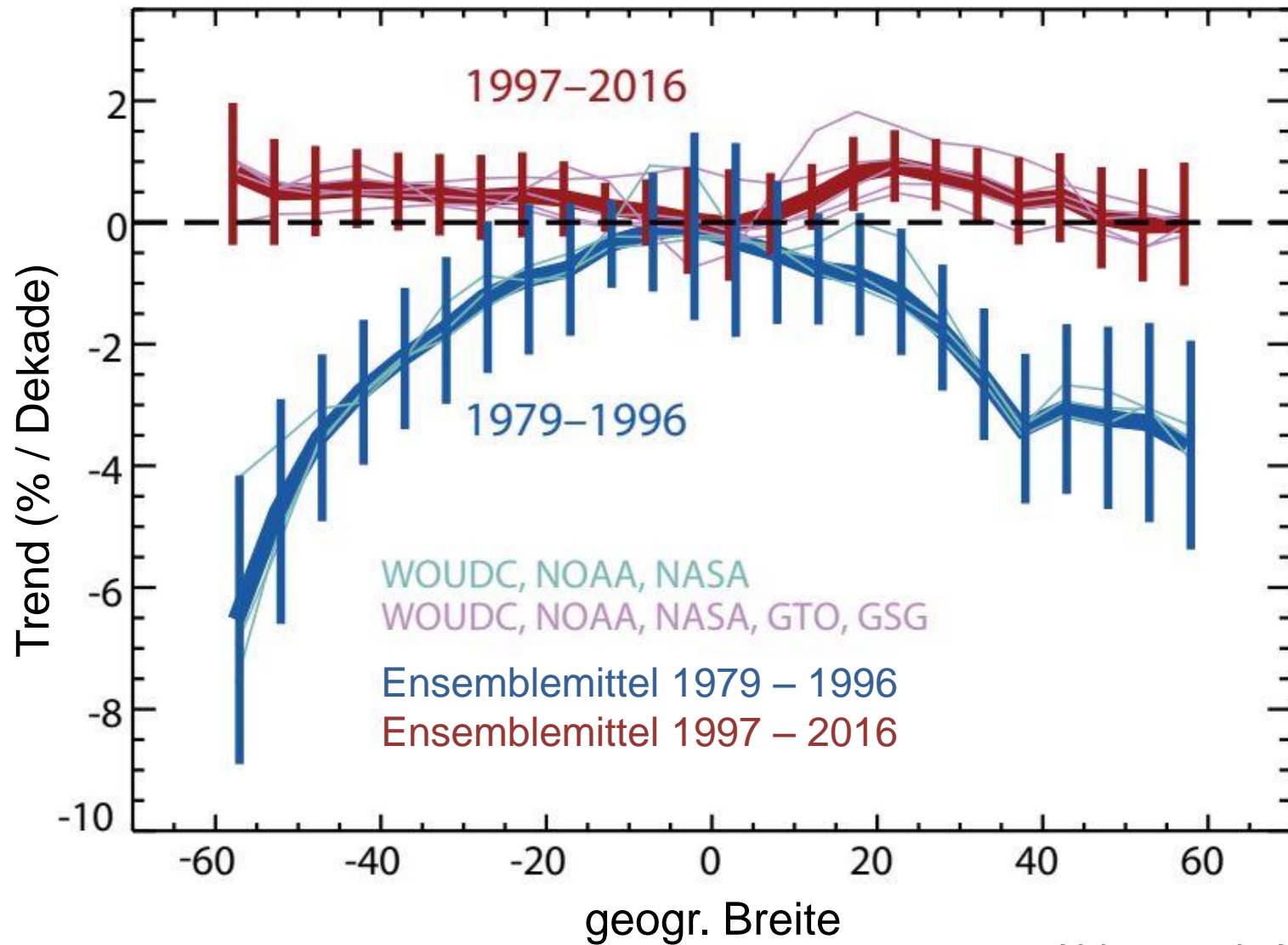


Abb. 3.12 in WMO, 2018



Ozontrends in mittleren nördlichen Breiten (35°N - 60°N)

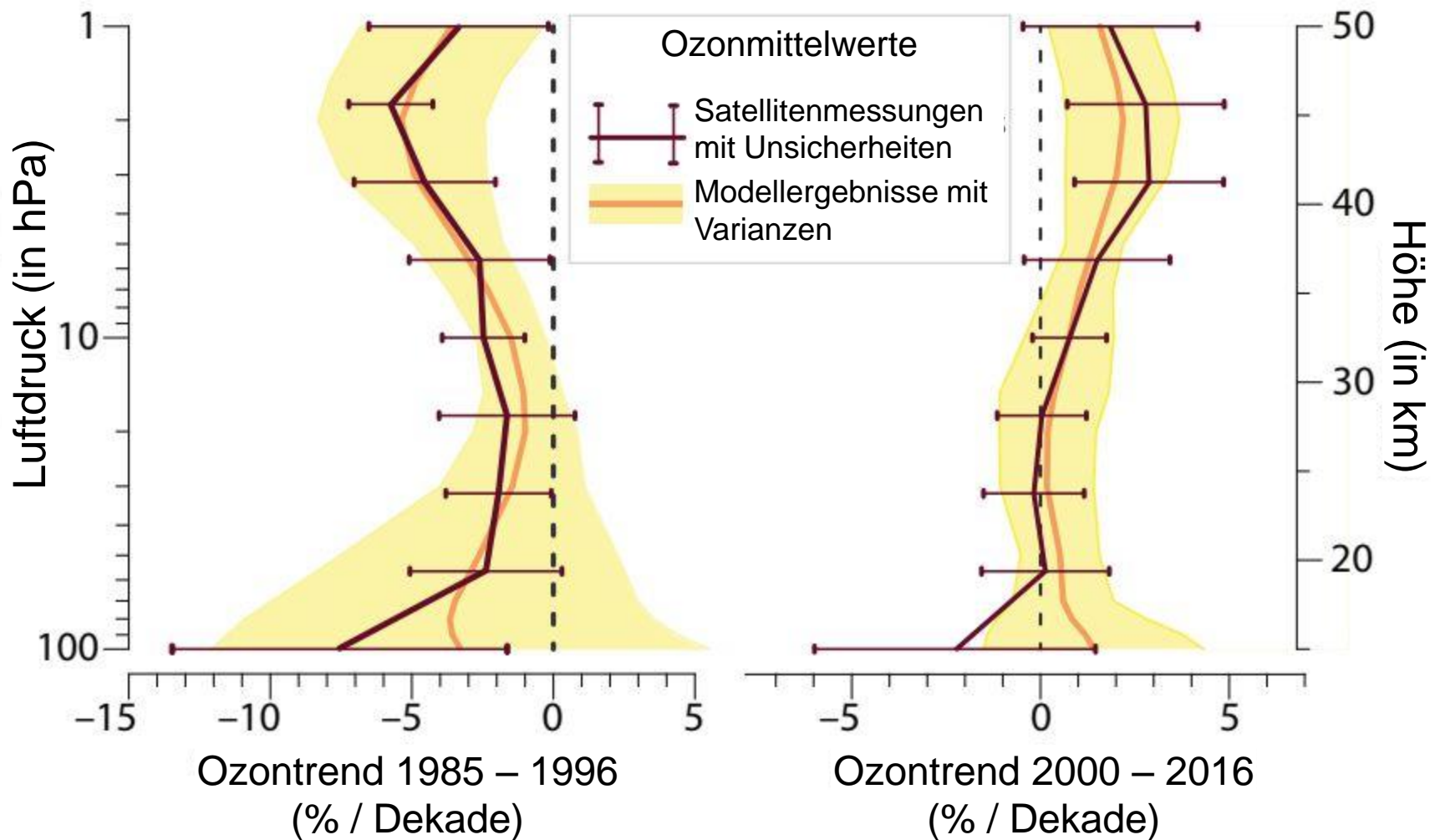


Abb. ES-7 in WMO, 2018



Stand des Wissens (WMO, 2018)

<https://www.esrl.noaa.gov/csd/assessments/ozone/2018/report/>

Entwicklung der Ozonschicht in den Polarregionen



Ozonänderungen über der Arktis und Antarktis im Frühling

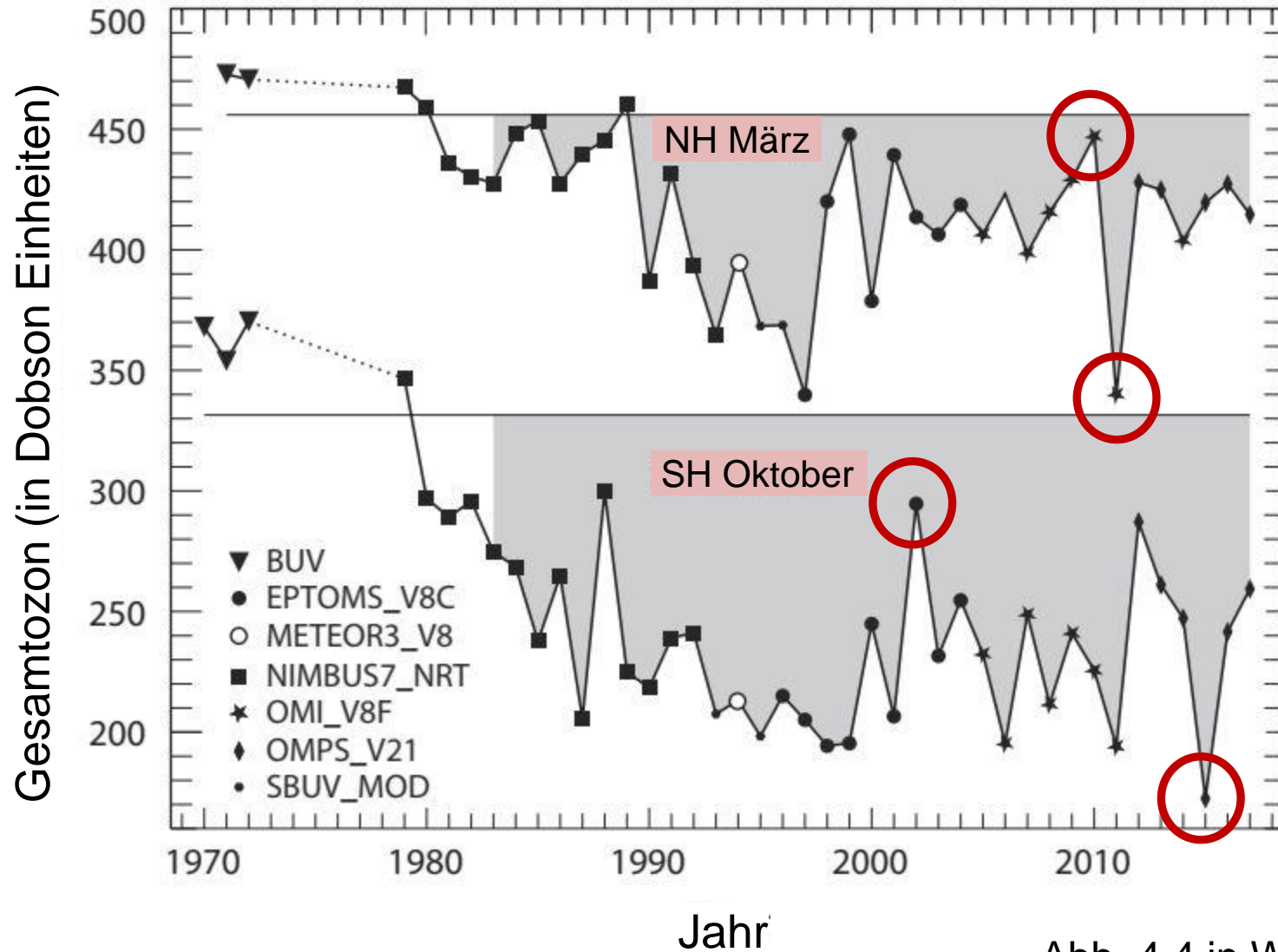
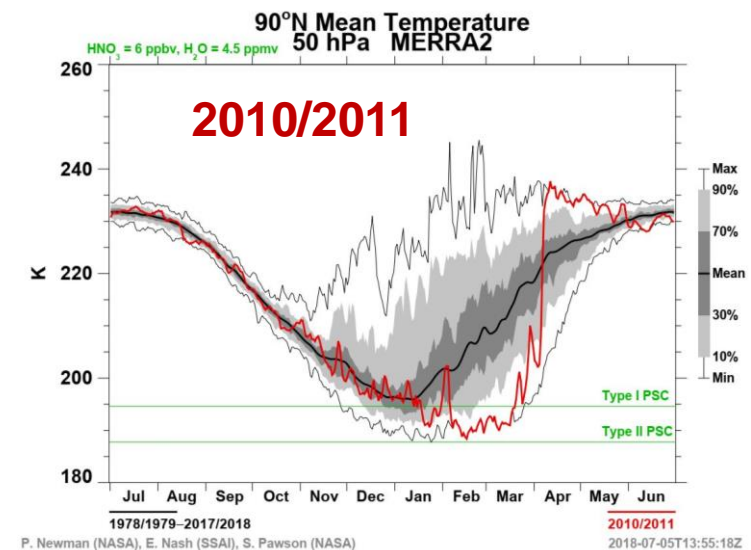
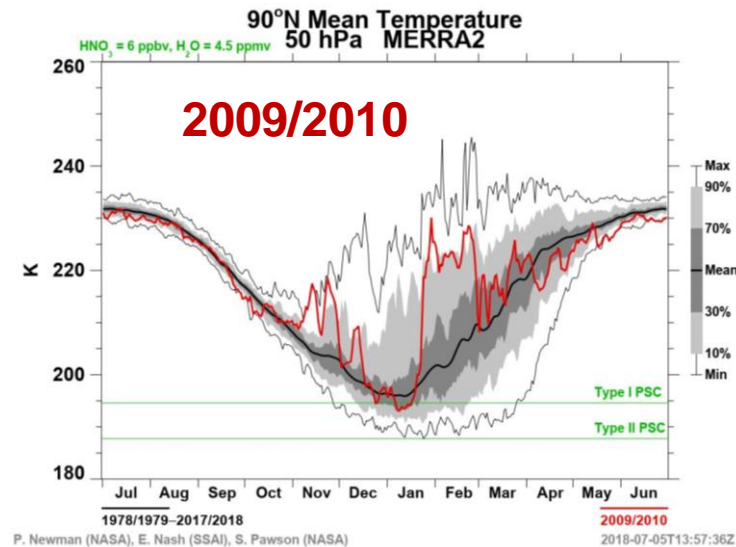
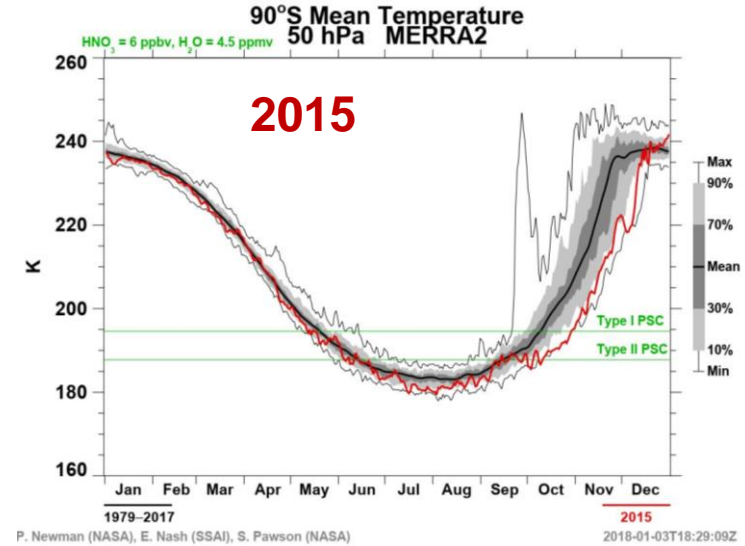
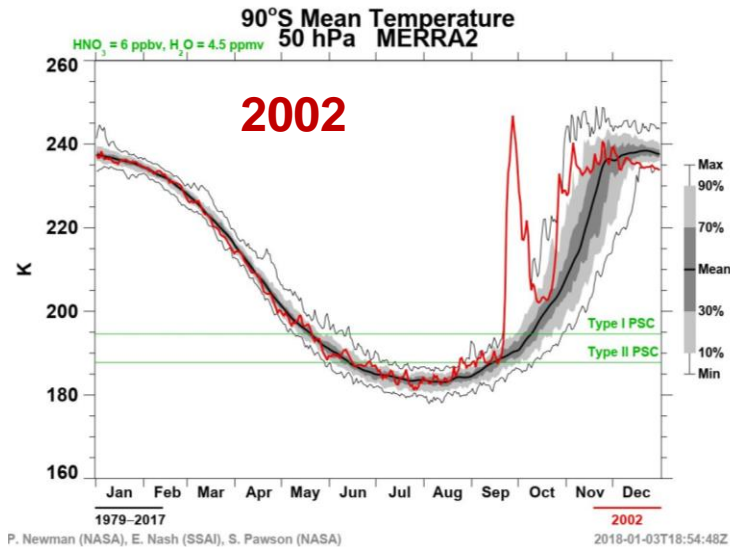


Abb. 4.4 in WMO, 2018



Temperaturfluktuation in der Arktis und Antarktis



Ozonänderungen in der Arktis und Antarktis im Frühling

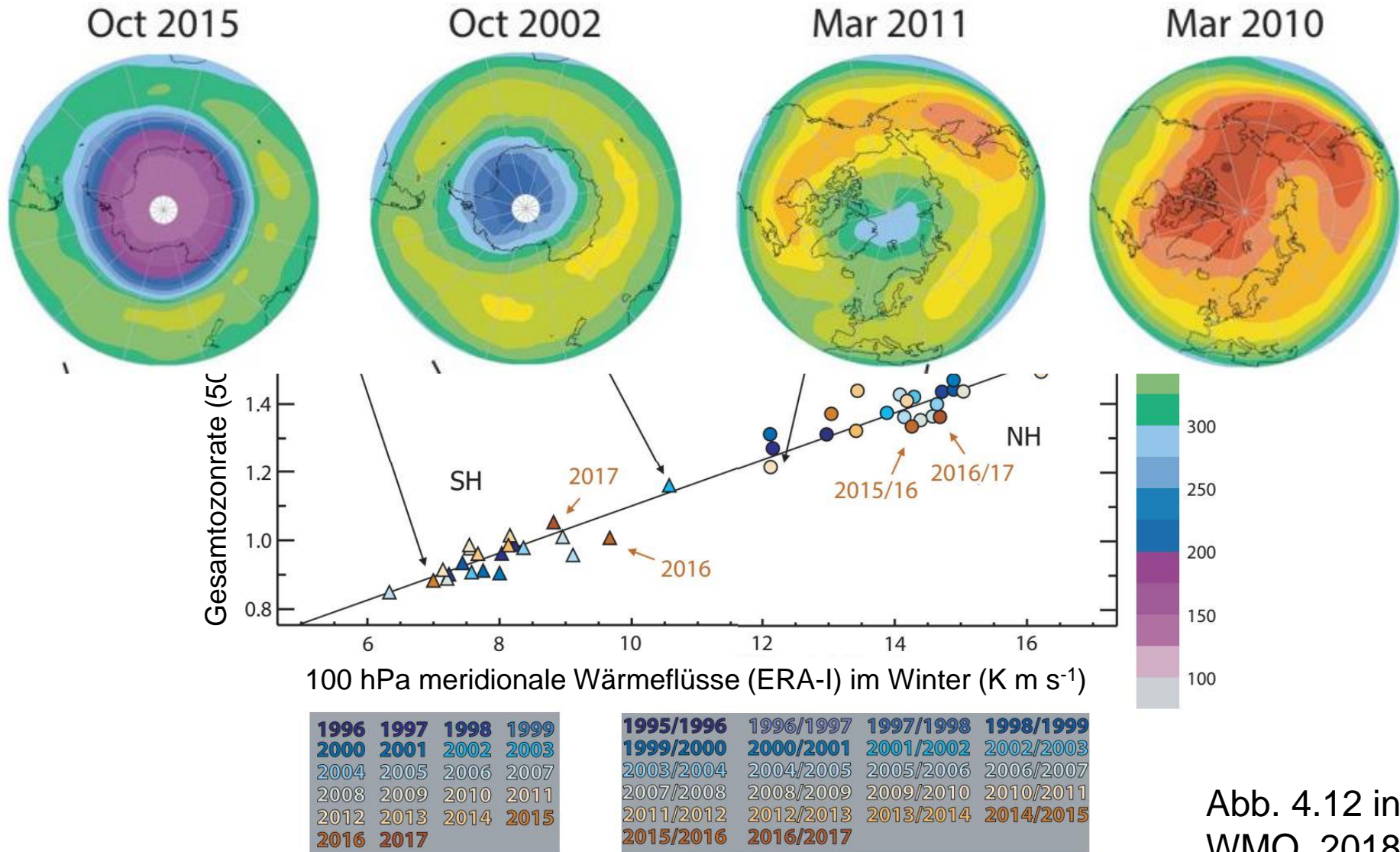
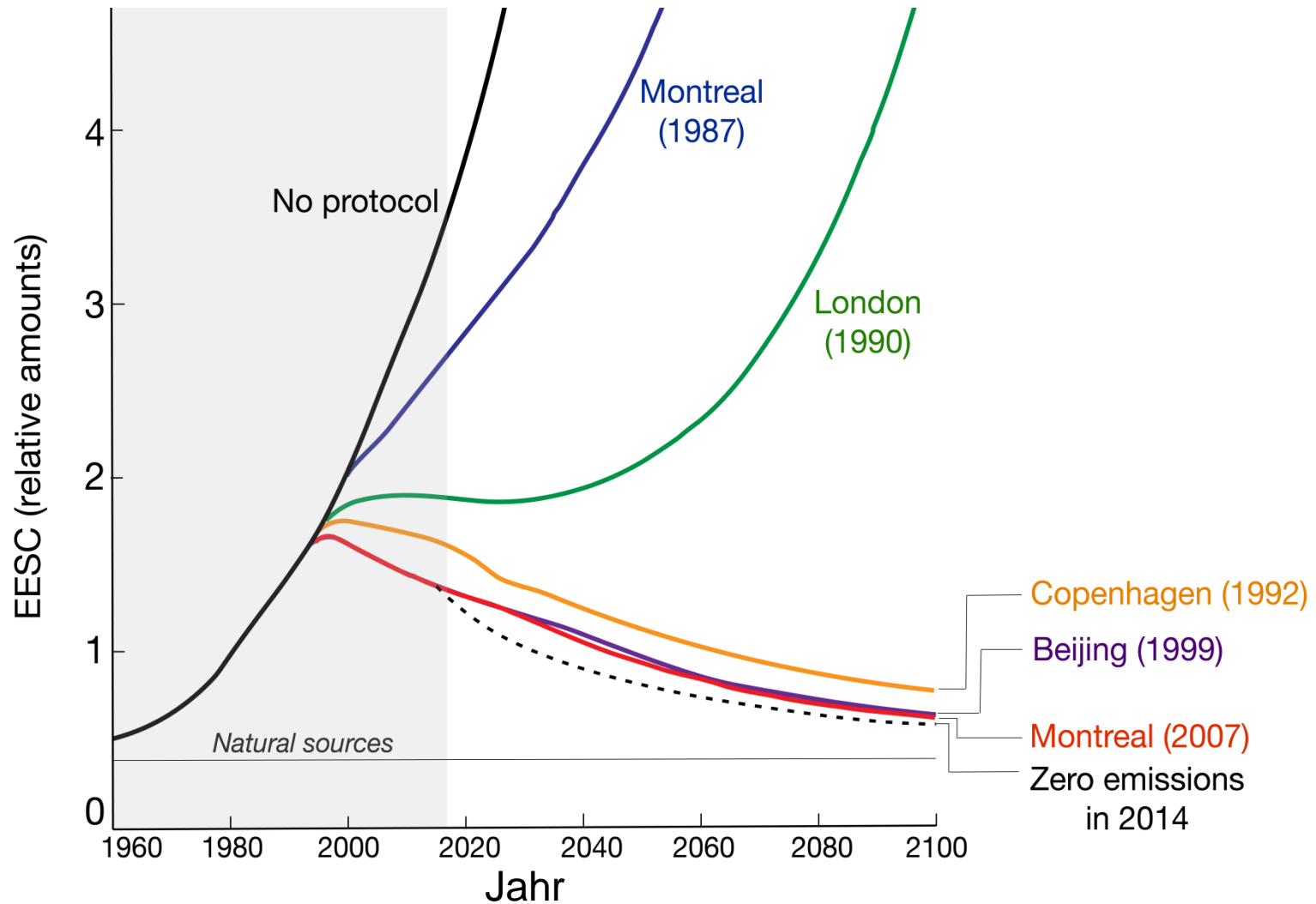


Abb. 4.12 in
WMO, 2018



“Equivalent Effective Stratospheric Chlorine” (EESC)

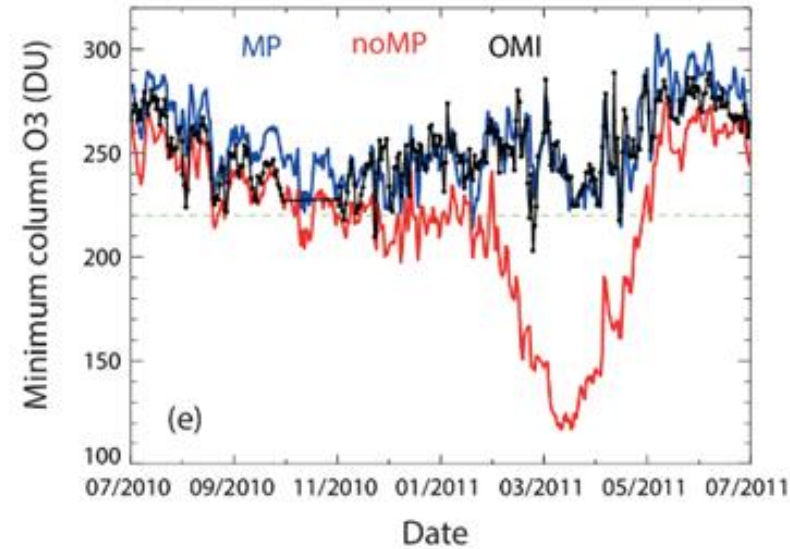
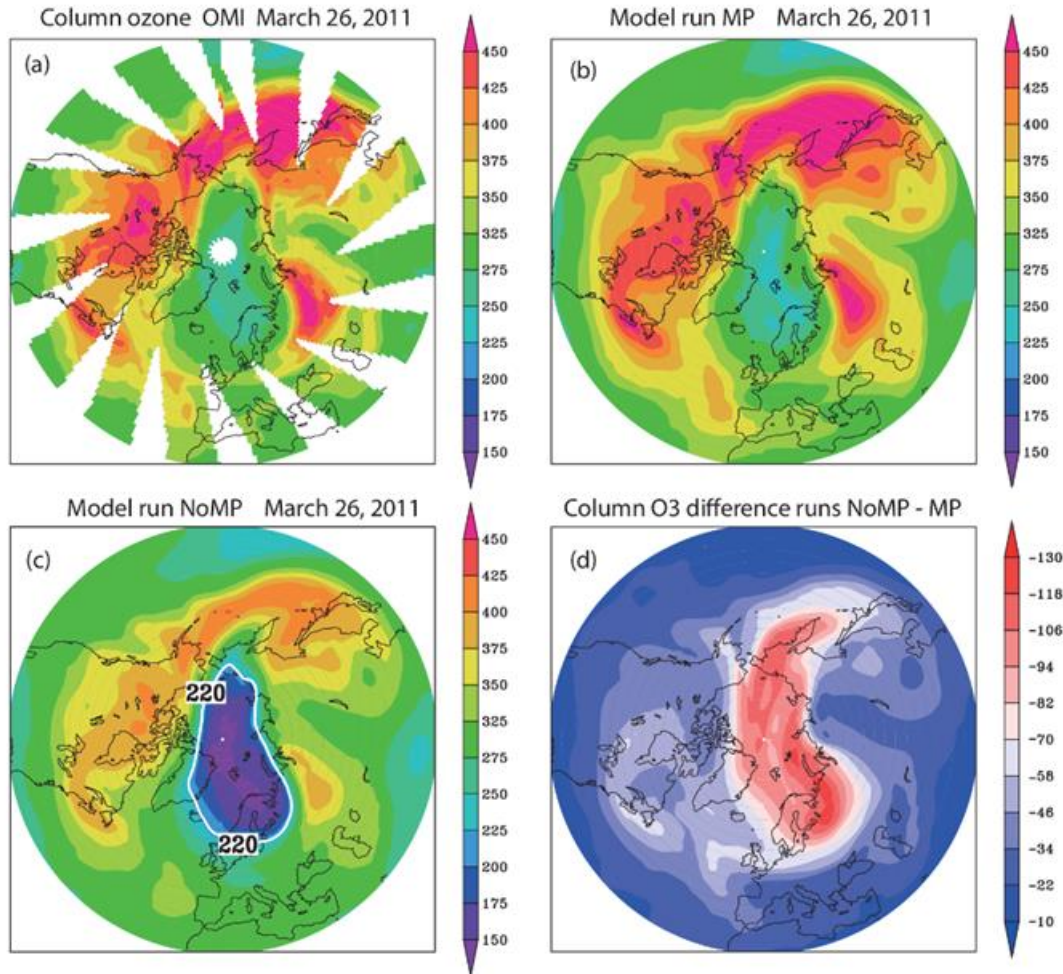


Source: Montreal Protocol Scientific Assessment Panel (2014). Twenty Questions and Answers About the Ozone Layer. The data visualization is available at [OurWorldinData.org](https://www.ourworldindata.org). There you will find more on this topic.

Licensed under CC-BY-SA by the authors.



Gesamtozonverteilung über der Arktis am 26. März 2011: Satellitenbeobachtungen (OMI) und Modelldaten



Links: Gesamtozon am **26. März 2011**, von (a) OMI, (b) einer Modellrechnung unter Annahme der Kontrolle Ozonabbauender Substanzen nach dem Montrealer Protokoll (MP) und (c) eine Modellrechnung ohne Kontrolle der Ozon zerstörenden Substanzen (noMP). (d) zeigt die Differenz (noMP-MP). Oben: (e) Minimum der Gesamtozonsäule ($>45^\circ\text{N}$) im Winter 2010/11.



Chemistry-Climate Model (CCM) Initiative (CCMI)

CCMI ist organisiert durch **IGAC/SPARC**



SPARC
Stratosphere-troposphere
Processes And their Role in Climate



(International **G**lobal **A**tmospheric **C**hemistry /
Stratosphere-troposphere **P**rocesses **A**nd their **R**ole in **C**limate)

CCMI hat in Kooperation mit Wissenschaftlern die Randbedingungen für neue CCM Referenz- und Sensitivitätssimulationen definiert.

Ziele der Modellsimulationen sind

- entsprechende Sachstandsberichte der WMO (zum Status der Ozonschicht) und von IPCC (Klimaberichte) zu unterstützen,
- auftauchende wissenschaftliche Fragen zu bearbeiten sowie
- das Verständnis relevanter Prozesse zu verbessern.



Strategie für CCMI Simulationen

Es wurden von CCMI drei Arten numerischer Referenz-Klimasimulationen (REF) definiert, die den Bereich der Troposphäre und der Mittleren Atmosphäre (bis 100 km) überdecken:

- (1) Eine Simulation der Vergangenheit (von 1979 bis 2017), bei der die vom Modell berechnete Dynamik in Richtung der beobachteten Meteorologie „gestoßen“ (engl. nudged) wird ([REF-C1SD](#)),
- (2) eine „frei“-laufende Simulation, welche die Vergangenheit (1960-2017) repräsentiert ([REF-C1](#)) und
- (3) eine kombinierte Simulation von der Vergangenheit in die Zukunft (vom 1960 bis 2100; [REF-C2](#), RCP6.0) entweder mit vorgeschriebenen Meeresoberflächentemperaturen und Meereisbedeckung oder mit einem interaktiv gekoppelten Ozean.

Ferner wurden eine Reihe von Sensitivitätssimulationen (SEN) vorgeschlagen, z.B. mit unterschiedlichen Randbedingungen hinsichtlich ozonzerstörender Substanzen oder Treibhausgasen.



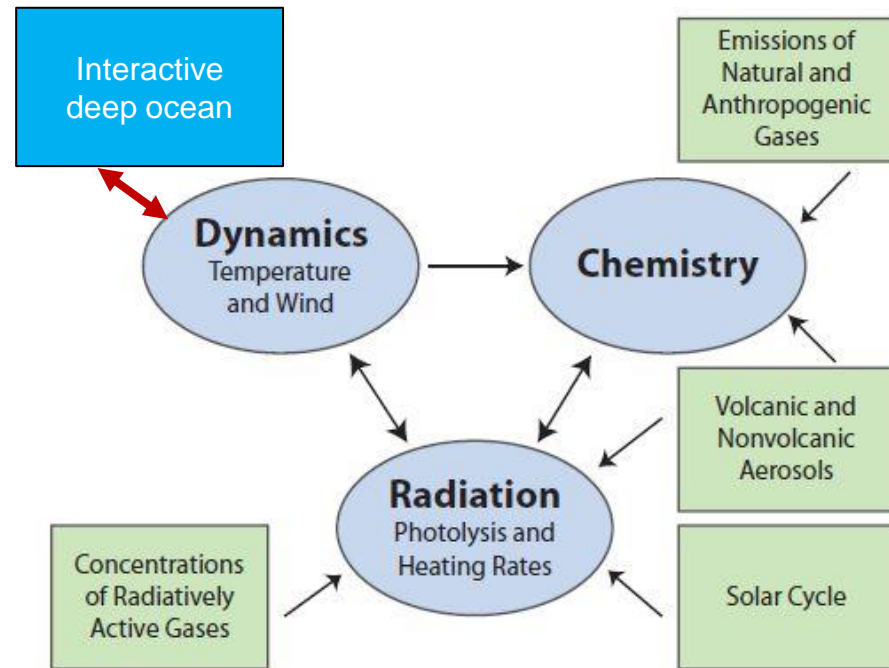
Beispiel für ein CCM System: EMAC

EMAC steht für:

European Centre for Medium-Range Weather Forecasts - Hamburg (ECHAM) / Modular Earth Submodel System (MESSy) Atmospheric Chemistry model

- Umfassende Beschreibung stratosphärischer und troposphärischer Chemie;
- Modellauflösung: T42/L90 (T42: $2.8^\circ \times 2.8^\circ$, L90: 0-80 km).

(Ausführliche Beschreibung: siehe Jöckel et al., 2016.)



“Equivalent Effective Stratospheric Chlorine” (EESC)

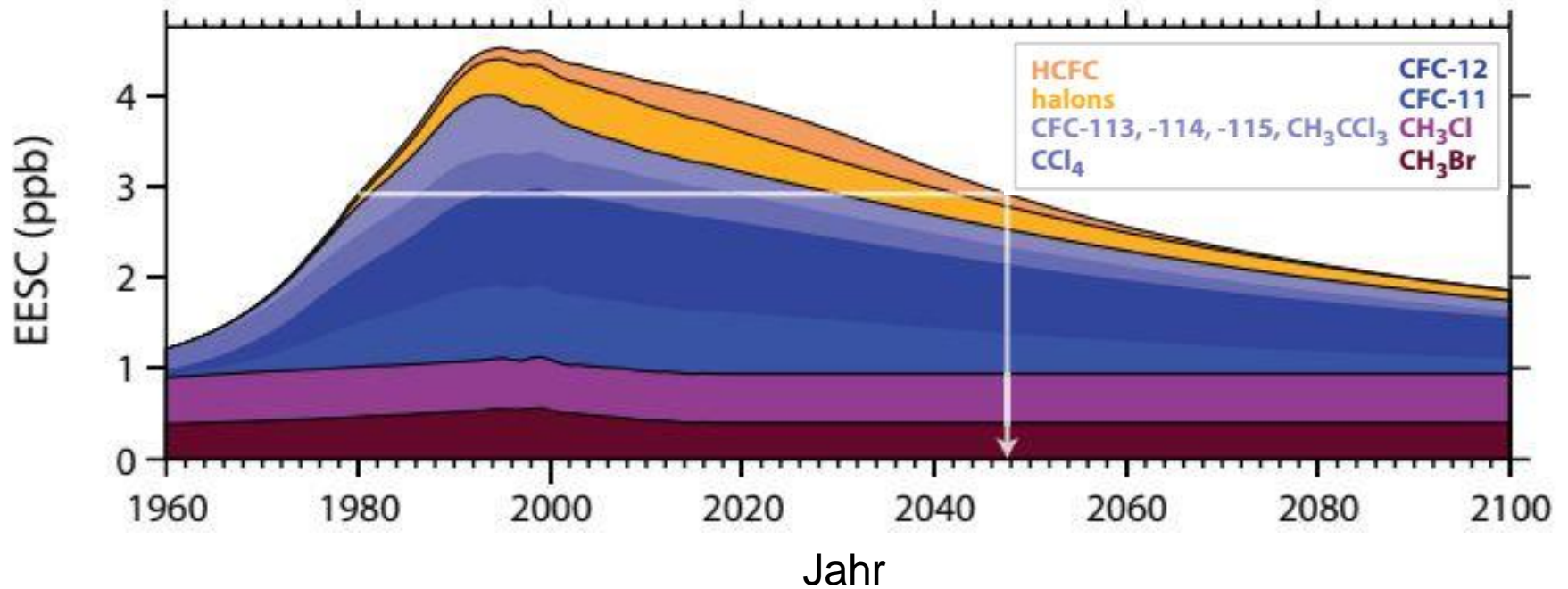
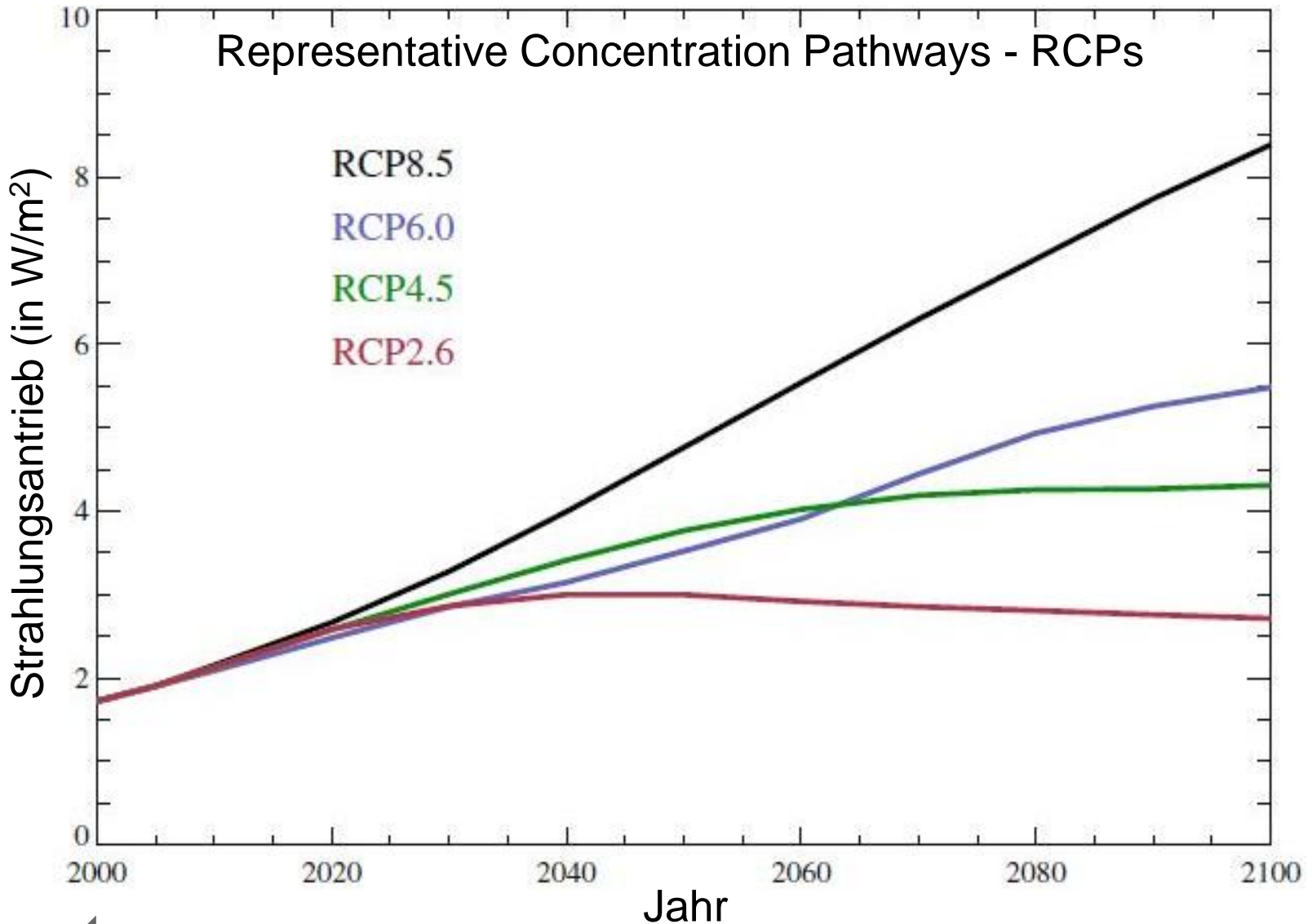


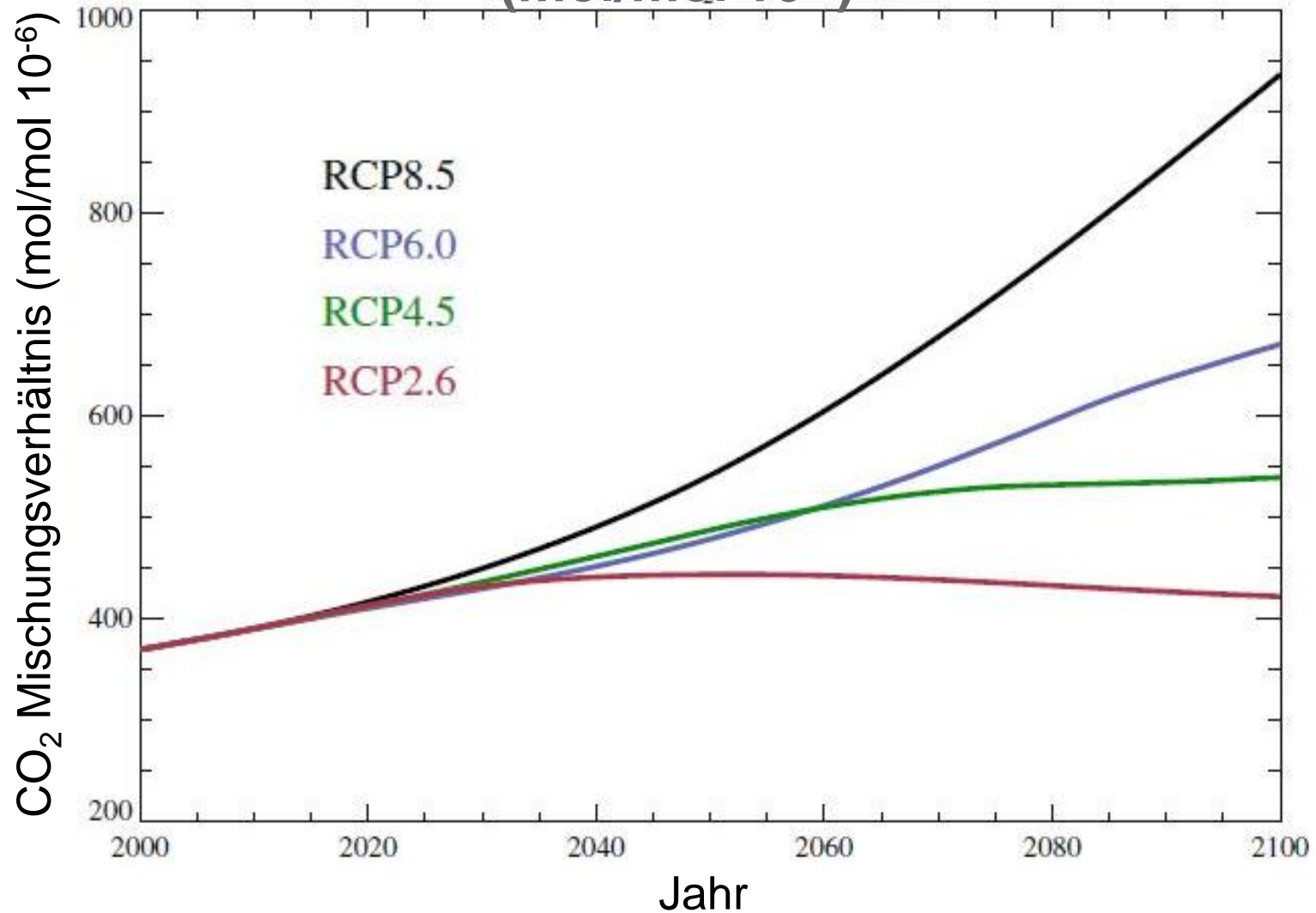
Abb. ES-1 in WMO, 2018



Zukünftige Szenarien des Strahlungsantriebs (W/m^2)

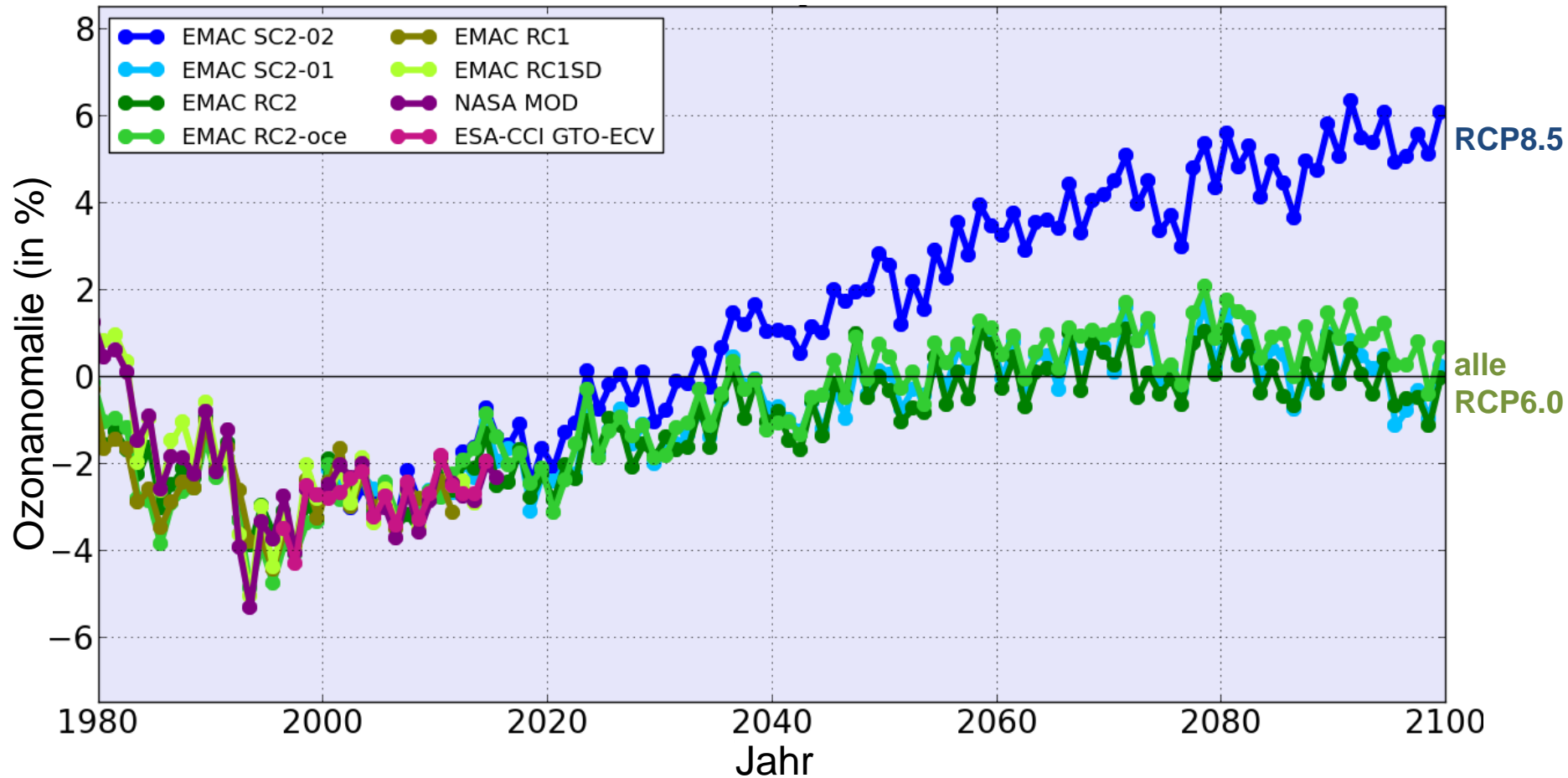


Szenarien für zukünftige CO₂ Mischungsverhältnisse (mol/mol 10⁻⁶)



Ozonanomalien (1960-2100): 60°S - 60°N

Vergleich von Satelliten- und Modelldaten (EMAC) sowie Prognosen

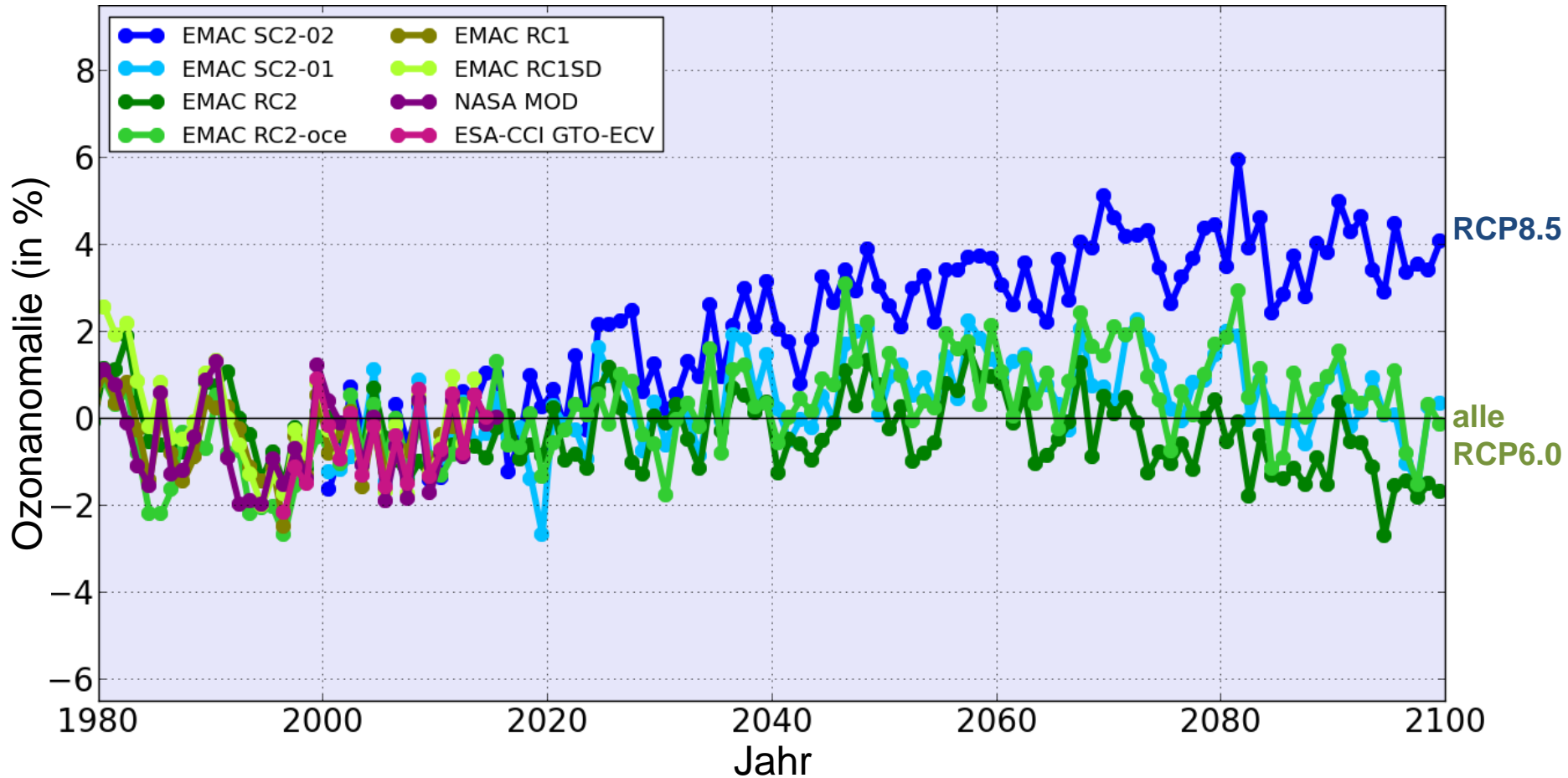


Ergänzung zu Jöckel et al., 2016



Ozonanomalien (1960-2100): 20°S - 20°N

Vergleich von Satelliten- und Modelldaten (EMAC) sowie Prognosen



Ergänzung zu Jöckel et al., 2016



Ozontrends (in DU) in mittleren Breiten, den Tropen und im globalen Mittel (außerhalb der Polarregionen)

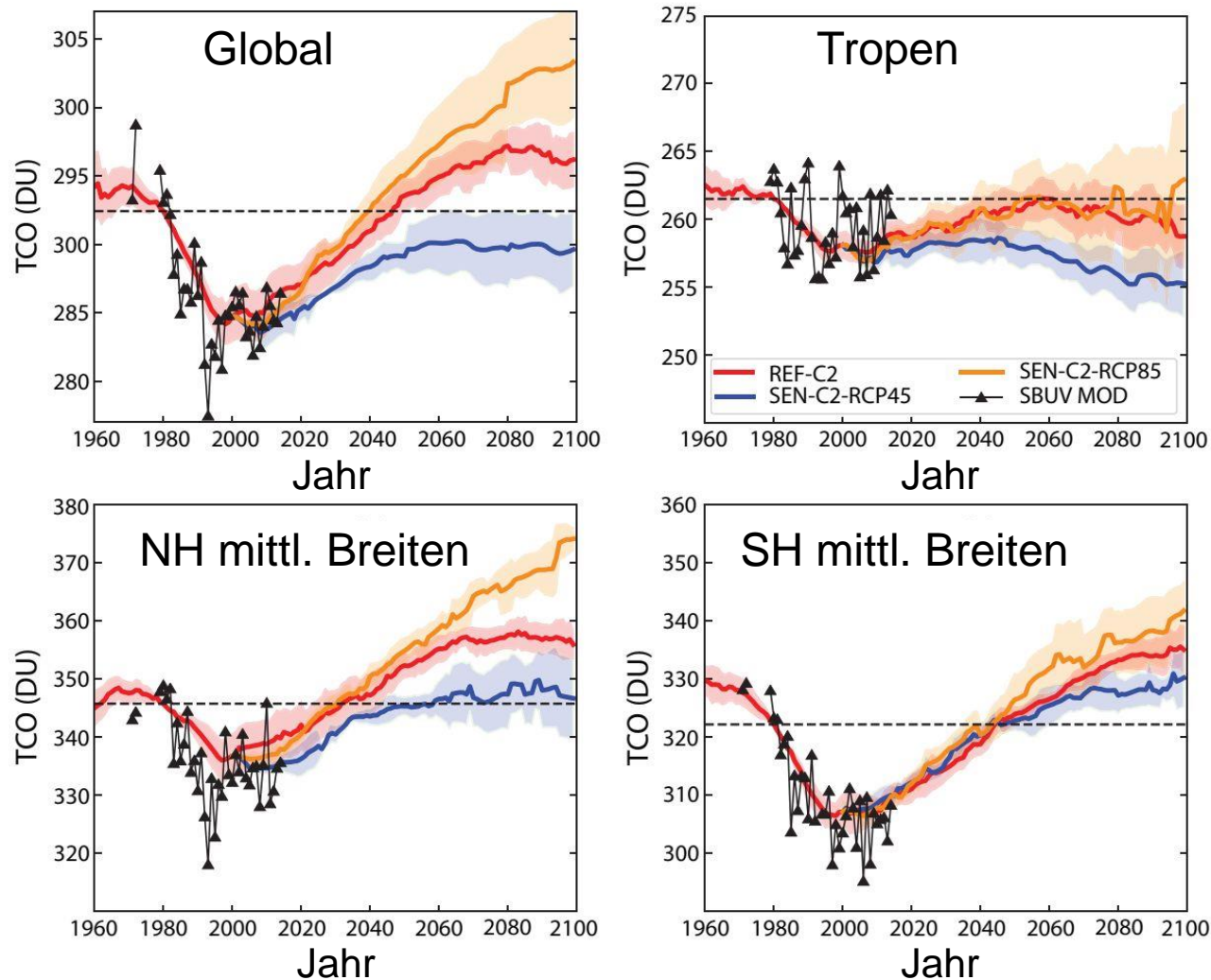
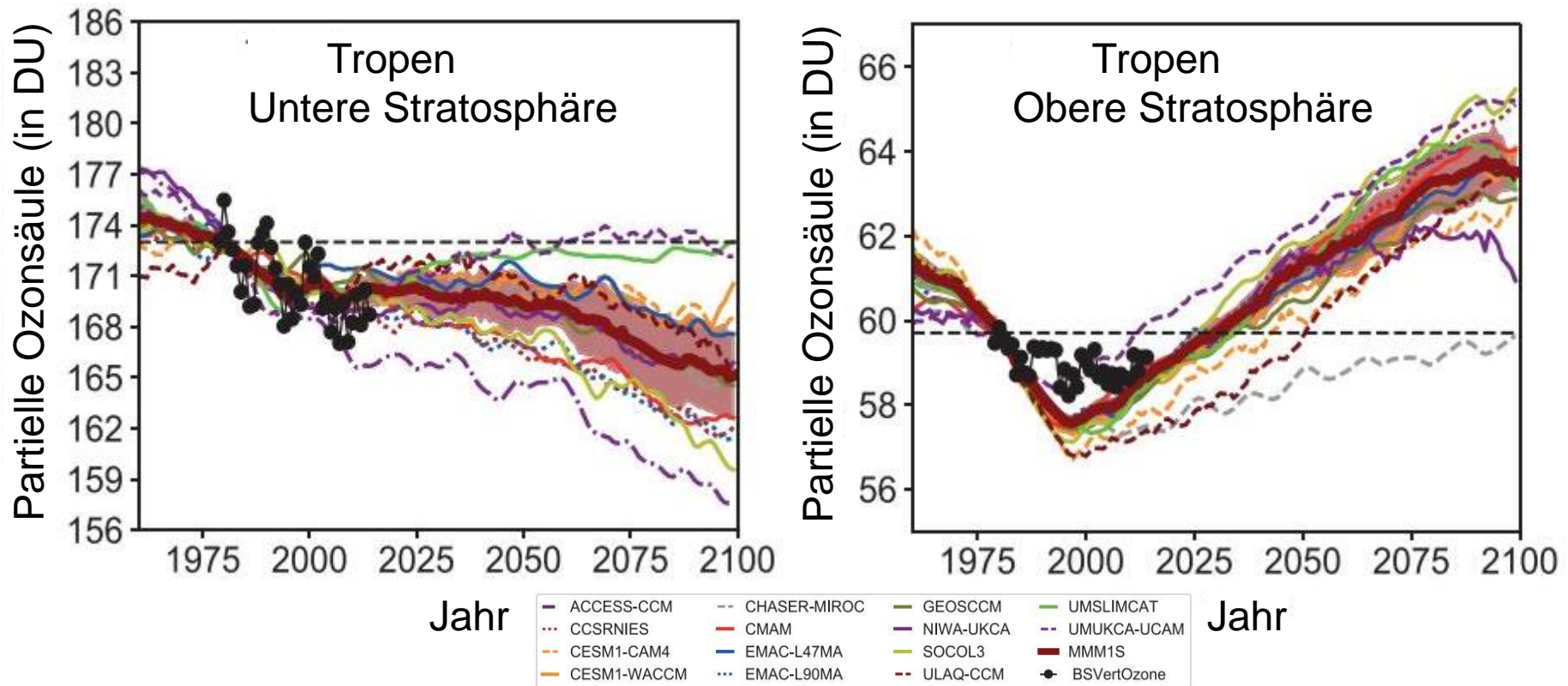


Abb. 3.29 in
WMO, 2018



Ozonänderungen (1970-2100): 20°S - 20°N

Vergleich von Satelliten- und Modelldaten sowie Prognosen



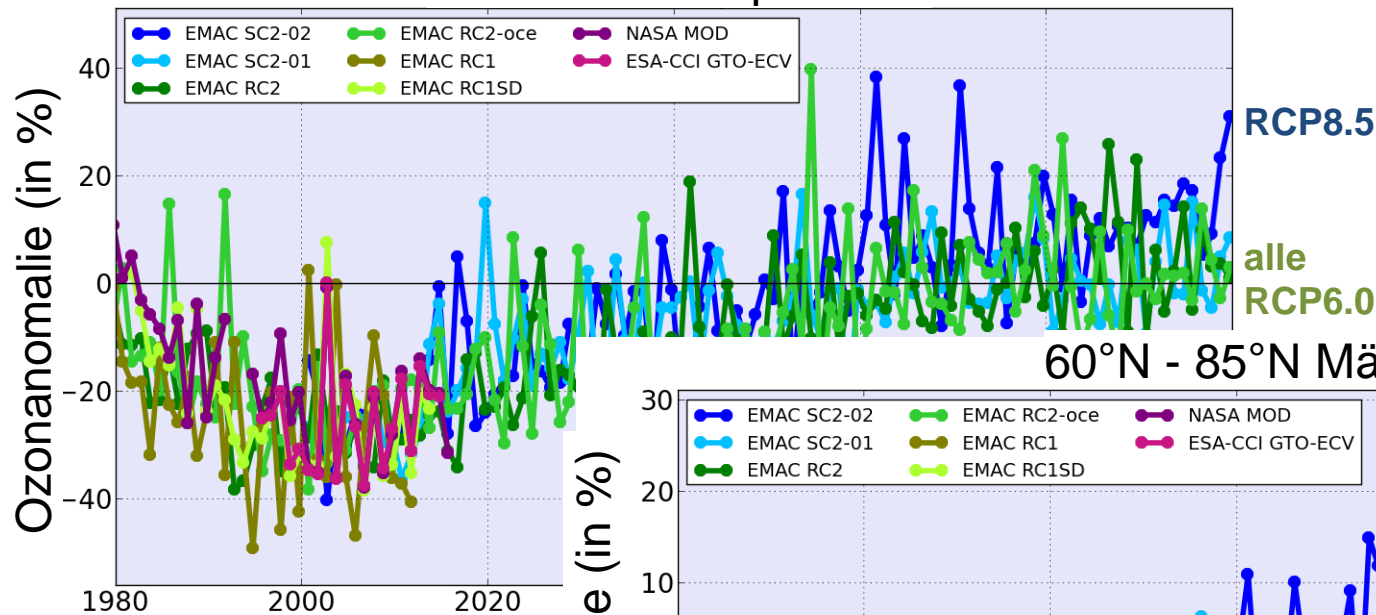
MMM: Mittelwert aller 14 CCM Simulationen (REF-C2; RCP6.0)



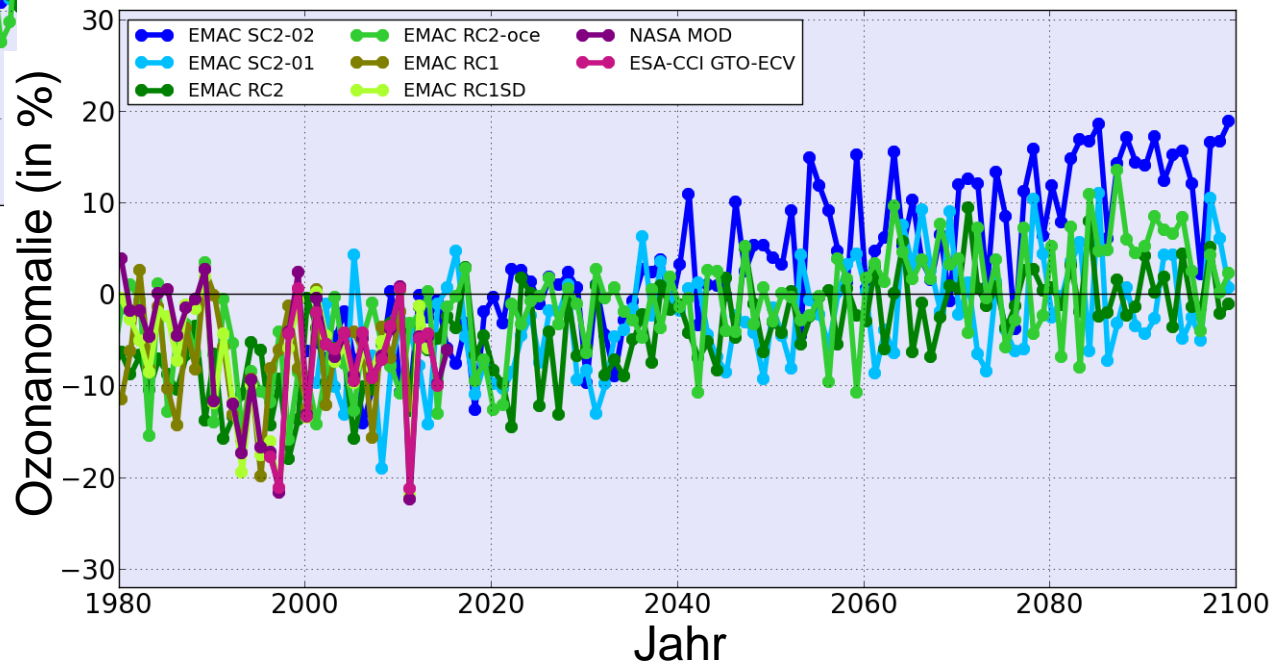
Ozonanomalien (1960-2100): Polarregionen, Frühling

Vergleich von Satelliten- und Modelldaten (EMAC) sowie Prognosen

60°S - 85°S September



60°N - 85°N März



Ozonänderungen (1970-2100): Polarregionen, Frühling

Vergleich von Satelliten- und Modelldaten (MMM) sowie Prognosen

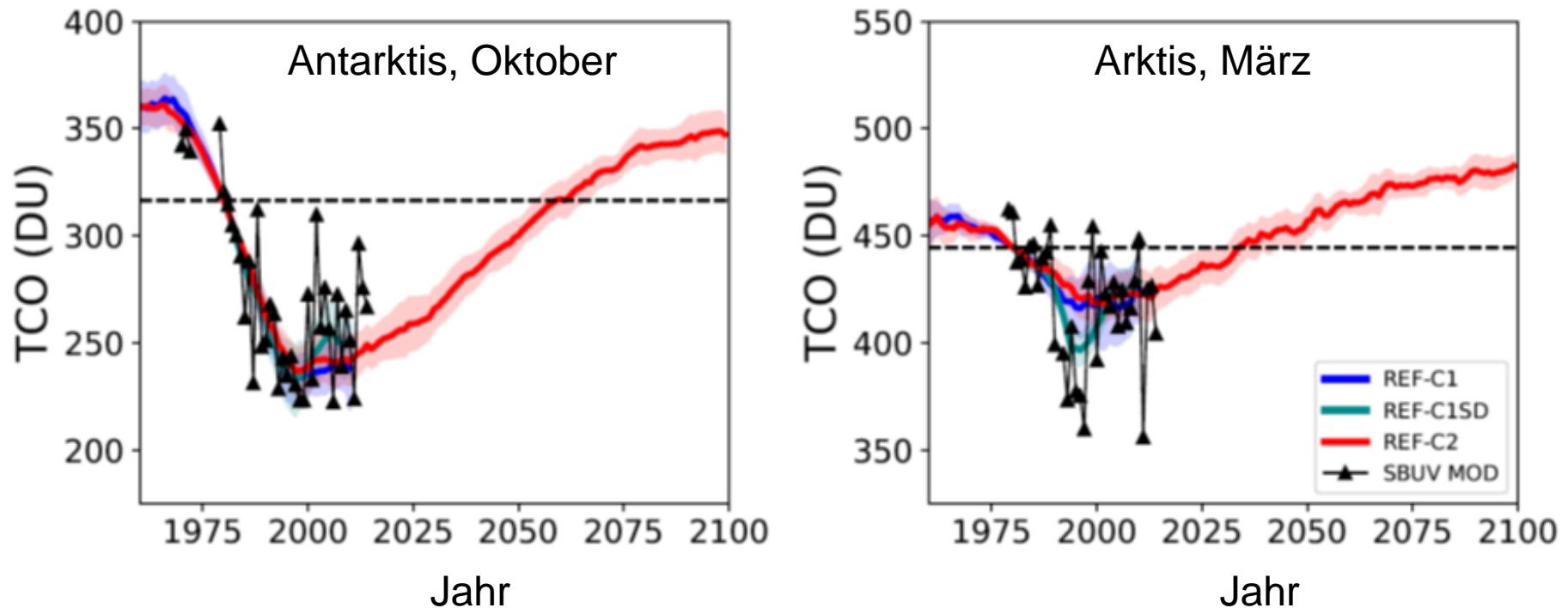
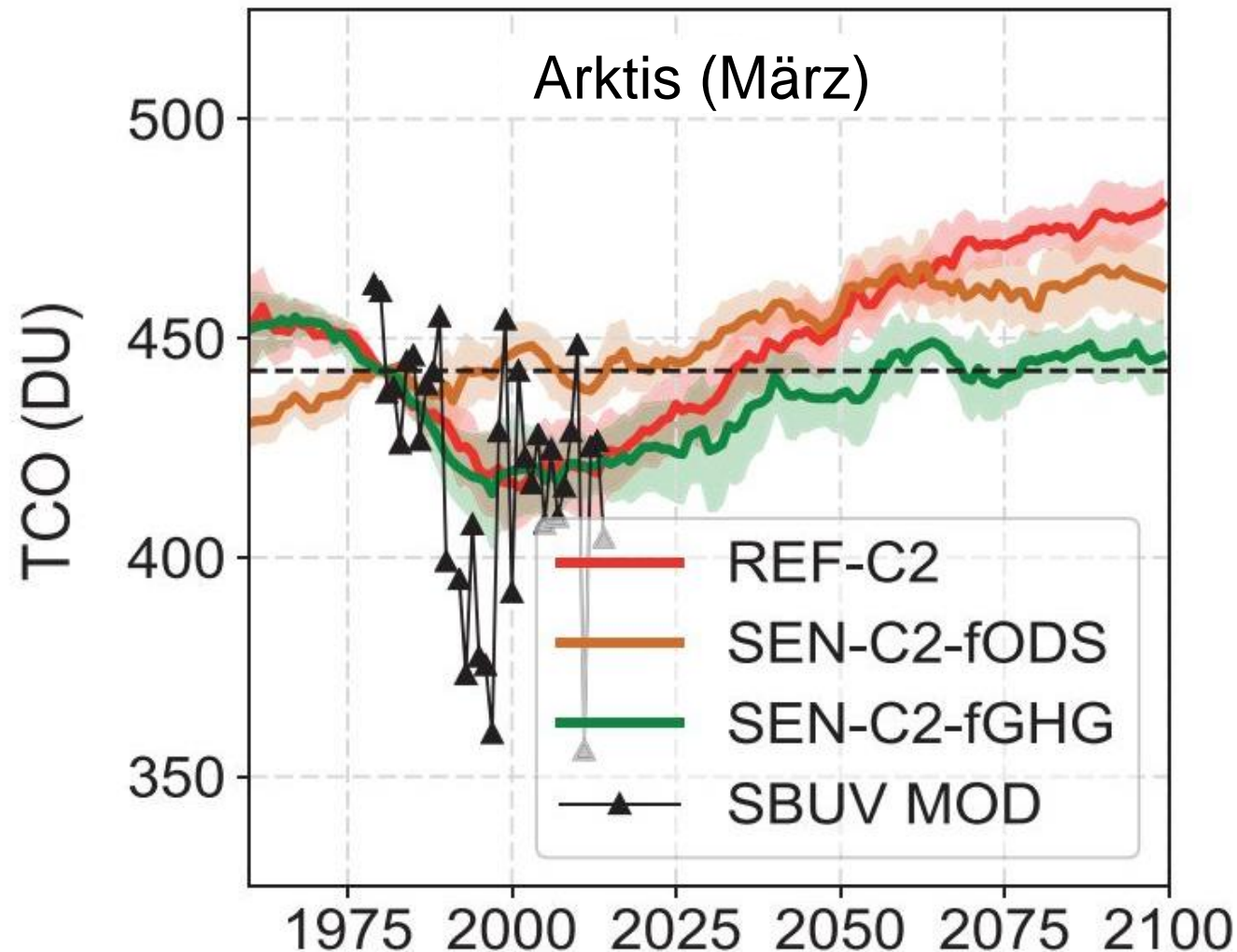


Abb. 4-18 in WMO, 2018; entnommen aus Dhomse et al., 2018



Ozonänderungen (1960-2100): Polarregionen

Vergleich von Satelliten- und Modelldaten (MMM) sowie Prognosen

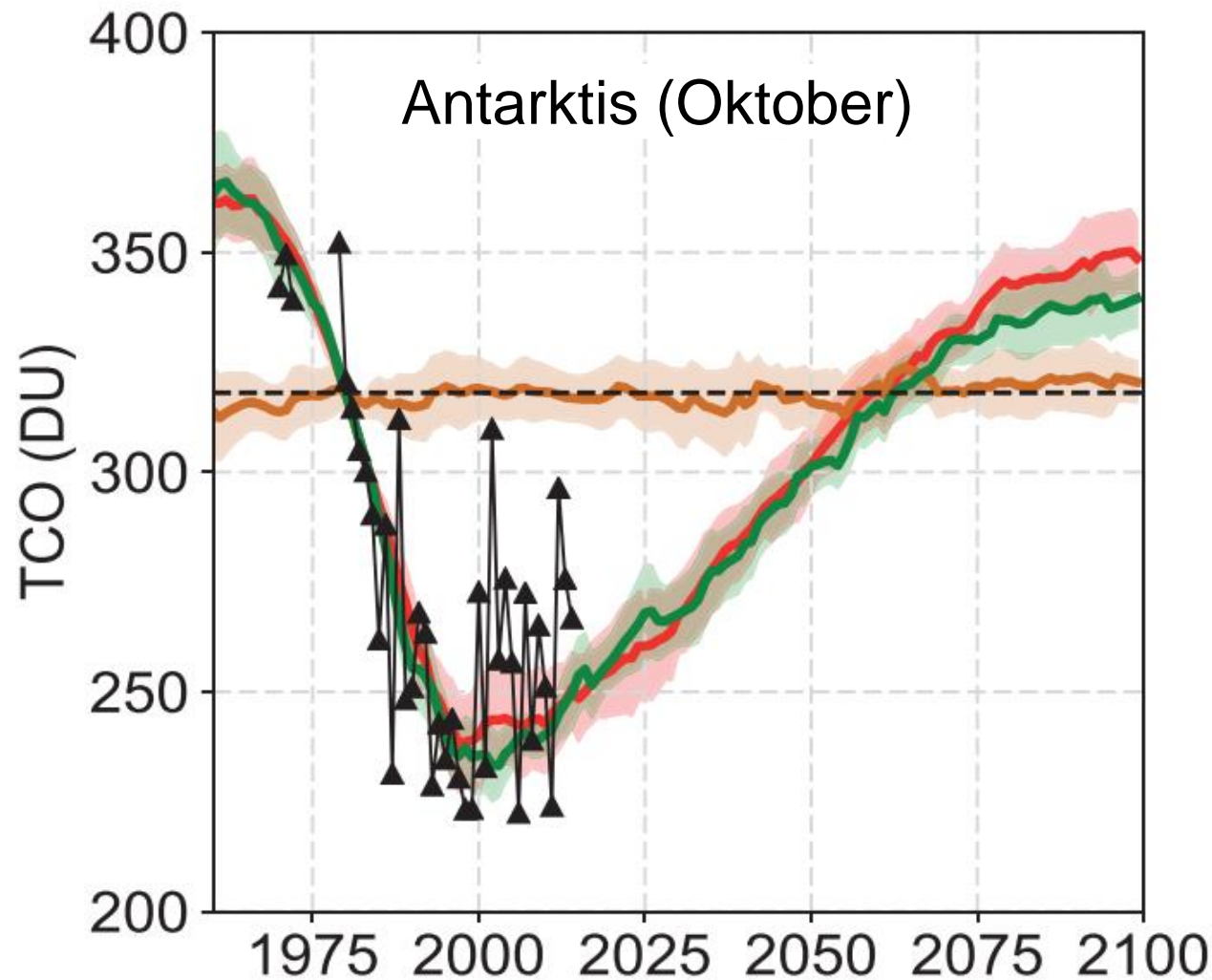
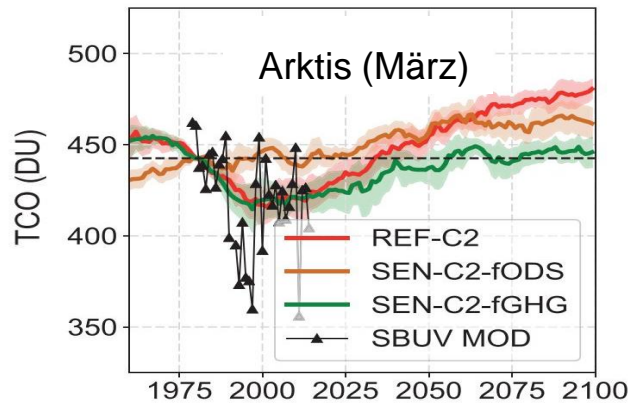


(Abb. 4-19 in WMO, 2018; adopted from Dhomse et al., 2018)



Ozonänderungen (1960-2100): Polarregionen

Vergleich von Satelliten- und Modelldaten (MMM) sowie Prognosen

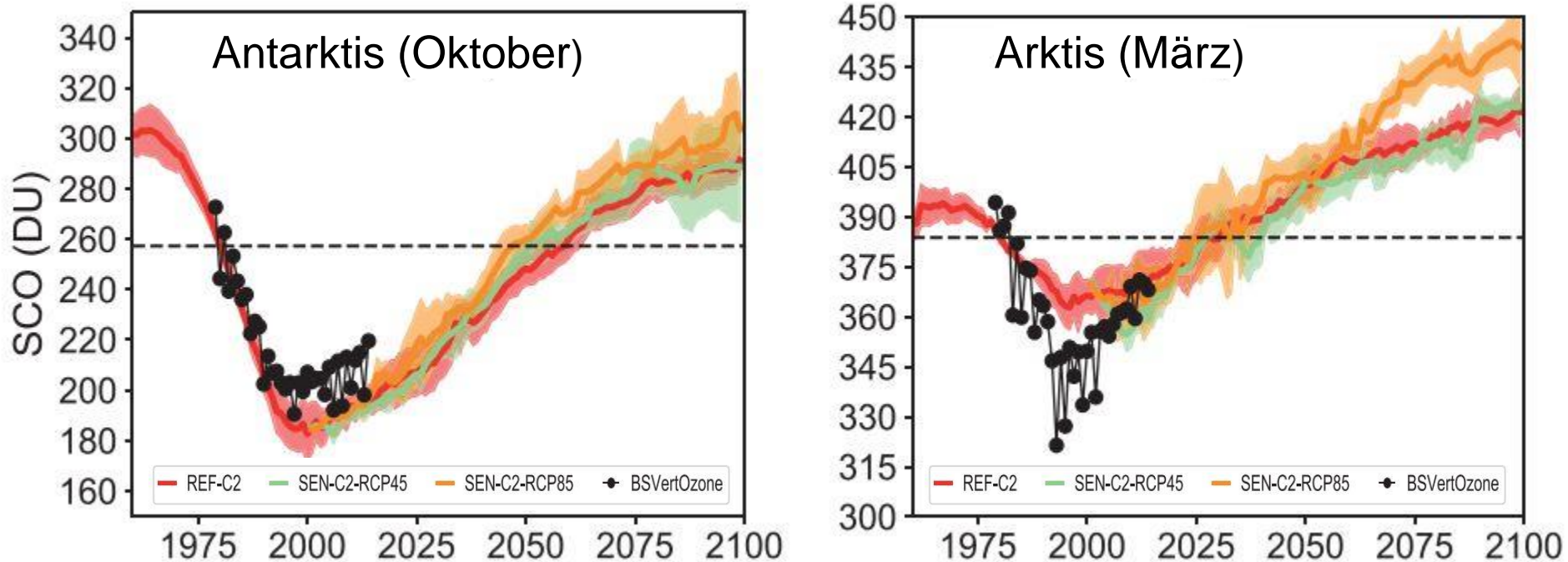


(Abb. 4-19 in WMO, 2018; adopted from Dhomse et al., 2018)



Ozonänderungen (1960-2100): Polarregionen im Frühling

Ergebnisse unterschiedlicher Klimaänderungsszenarien (Stratosphärensäule)



MMM aller CCM Simulationen:

Partielle Ozonsäulen der Stratosphäre für die Klimaänderungsszenarien

REF-C2 (i.e. RCP6.0) sowie **SEN-C2-RCP45** und **SEN-C2-RCP85**. Ozon Beobachtungsdaten: **BSVertOzone** (Bodeker et al., 2013; Hassler et al., 2018).

Abbildung entnommen aus Dhomse et al., 2018.



Zusammenfassung

- Es gibt erste Anzeichen für eine **Verringerung des antarktischen Ozonlochs** hinsichtlich seiner Stärke und Größe; deutlichste Hinweise finden sich im September. Der Rückgang der Ozon zerstörenden Substanzen (Montrealer Protokoll) spielt dabei eine entscheidende Rolle.
- Trotz dieser positiven Hinweise, abgeleitet aus Messdaten, wird das Ozonloch über der Antarktis noch viele Jahre weiter existieren.
- Über der Arktis ist die Jahr-zu-Jahr Variabilität der Ozonschicht sehr viel stärker ausgeprägt als über der Antarktis. Daher ist ein **Nachweis einer Erholung der arktischen Ozonschicht** in den letzten Jahren **noch nicht gelungen**.
- Ein starker Ozonabbau im Bereich der nordpolaren Region, wie im Frühling 2011 gefunden, gab es in den letzten 8 Jahren nicht (einschließlich 2019).
- In den kommenden Jahrzehnten können substantielle Ozonverluste über der Arktis in sehr kalten Wintern (in der Stratosphäre) noch auftreten, so lange die Konzentrationen Ozon zerstörender Substanzen noch hoch sind.



Zusammenfassung

- Die Modellmittelwerte der CCM Simulationen hinsichtlich des stratosphärischen Ozons sind in guter Übereinstimmung mit Satelliten gestützten Beobachtungen.
- CCM Simulationen zeigen, dass die Umsetzung des Montrealer Protokolls bereits substantielle Beiträge zum Schutz der Ozonschicht geleistet haben.
- Die CCM Vorhersagen basieren auf der vollständigen Umsetzung des Montrealer Protokolls sowie der Annahme des **RCP6.0** Klimaänderungszenario. Demnach **schließt sich das antarktische Ozonloch um das Jahr 2060.**
- Die Erholung der Ozonschicht im Bereich der **Arktis** hängt stark vom Klimawandel ab. Die Ozonwerte sollten bis **etwa Mitte der 2030er Jahre** auf Normalwerte (vor 1980) zurück gehen.
- Unter der Annahme der vollständigen Umsetzung des Montrealer Protokolls werden in der **2. Hälfte des 21. Jahrhunderts** die Treibhausgase CO₂, CH₄ und N₂O die dominierenden Antriebe für nordpolare Ozonänderungen sein.



Zusammenfassung

- Der große Bereich der möglichen zukünftigen Niveaus der Treibhausgaskonzentrationen (CO_2 , CH_4 und N_2O) stellt eine große Unsicherheit hinsichtlich der Abschätzung der Erholung bzw. der weiteren Entwicklung der stratosphärischen Ozonschicht dar.
- Die zukünftige Entwicklung der stratosphärischen Ozonschicht hängt eng mit der Umsetzung des Montrealer Protokolls zusammen, aber sie wird auch deutlich durch Klimaänderungen beeinflusst werden. Die Folgen sind regional unterschiedlich.

